

УДК 624.1

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.2.56>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВИ ЗАКРІПЛЕНОЇ ЦЕМЕНТАМИ

Петраш Р. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та професійної освіти Полтавського державного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0002-5812-4044

Петраш О. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної та електричної інженерії Полтавського державного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0001-8151-6460

Попович Н. М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та професійної освіти Полтавського державного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0001-6450-6332

Бондар Л. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та професійної освіти Полтавського державного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0002-1595-7740

Яхін С. В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівництва та професійної освіти Полтавського державного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0002-0042-0844

Інженерно-геологічні умови більшої частини території України характеризуються наявністю лесових просадочних ґрунтів, товщина яких може сягати до 30 метрів. У таких умовах зведення промислових і цивільних будівель висотою понад п'ять поверхів доцільно здійснювати на палях різних типів.

Ґрунтоцемент являє собою матеріал, що утворюється внаслідок змішування природного ґрунту з цементом. У результаті формується міцна структура, стійка до впливу вологи та здатна витримувати значні навантаження. Цей матеріал активно використовується для створення ґрунтоцементних паль. Елементи меншого діаметра на його основі застосовуються для підсилення слабких ґрунтів, формуючи зону стабілізованої основи. Палі з ґрунтоцементу можуть служити надійною основою для будівель і споруд різного призначення, а також виконувати функції протифільтраційних екранів, підпірних конструкцій, укріплень укосів котлованів і зсувних ділянок. Крім того, ґрунтоцемент ефективно використовується як матеріал для облаштування дорожнього покриття.

В роботі розглянуто підбір оптимального складу ґрунтоцементної суміші. Планування експериментів та підбір складу ґрунтоцементу враховували різну витрату цементу і водоцементне відношення (В/Ц), а також добавки. Критерієм експерименту призначено міцність ґрунтоцементу на стиск (призмova міцність). Склад цементно-ґрунтових сумішей підбирався у лабораторії таким чином, щоб забезпечити отримання ґрунтоцементу з заданими міцностними характеристиками при мінімальній витраті цементу. Були виготовлені та випробувані на стиск дослідні зразки. Випробування виконували за допомогою преса при терміні набору міцності 7, 28, 56 діб.

Також розглянуті польові дослідження структури ґрунтоцементного елемента після 6 місяців твердіння. Елементи були відкопані і досліджені по глибині за допомогою метода penetрації. Основною задачею досліджень було визначення міцності ґрунтоцементу за довжиною палі.

Для перевірки ефективності армування основи у конкретних умовах будівельного майданчика були проведені дослідження її стисливості шляхом випробування ґрунтів

штампом. Перевірка стисливості основи була проведена у природному і зволоженому станах ґрунту до та після його армування.

Ключові слова: ґрунтоцемент, підсилення основи, міцність на стиск, стисливість, штампове випробування.

Petrash R. V., Petrash O. V., Popovych N. M., Bondar L. V., Yakhin S. V. Experimental investigation of base reinforced by cementation

Most of Ukraine's engineering and geological conditions are characterized by loess subsidence soils, which can be up to 30 meters thick. In such conditions, it is advisable to construct industrial and civil buildings with a height of more than five floors on piles of various types.

Soil cement is a material that is produced by combining natural soil with cement. The result is a robust structure that exhibits resistance to moisture and can withstand substantial loads. This material is currently employed in the construction of soil-cement piles. Smaller diameter elements based on it are used to improve loose soils, forming a stabilized base zone. Soil cement piles serve as solid foundation for buildings and structures of various functions, as well as waterproof sheeting, retaining structures, and reinforcements for foundation pit slopes and landslide areas. In addition, soil cement is effectively used as a material for road pavement construction.

The work considers the selection of the optimal composition of the soil-cement mixture. The planning of experiments and the selection of the soil-cement composition took into account different cement consumption and water-cement ratio (W/C), as well as additives. The criterion of the experiment was the compressive strength of the soil-cement (prism strength). The composition of the cement-soil mixtures was selected in the laboratory in such a way as to ensure the production of soil-cement with the specified strength characteristics at a minimum cement consumption. Experimental samples were manufactured and tested for compression. The tests were performed using a press with a curing period of 7, 28, and 56 days.

Field studies were conducted to examine the structure of the soil-cement element after a period of six months of curing. The elements were excavated and examined employing the penetration method. The primary objective of the study was to ascertain the strength of the soil-cement along the length of the pile.

To verify the effect of the base improvement in specific conditions of the construction site, studies of its compressibility were carried out by testing the soils with a stamp. The compressibility of the base was investigated in the natural and moistened states of the soil before and after its improvement.

Key words: soil-cement, ground improvement, compression strength, compressibility, stamp test.

Постановка проблеми. Зважаючи на те, що інженерно-геологічні умови кожної ділянки унікальні, доцільно при проектуванні фундаментів на основі, яка армована ґрунтоцементними елементами, дані інженерно-геологічних досліджень доповнювати лабораторними дослідженнями зразків з метою підбирання оптимального складу ґрунтоцементу і технології влаштування для конкретних ґрунтових умов.

Мета дослідження. Розробити методику підбору оптимального складу ґрунтоцементної суміші, в лабораторних умовах, та провести випробування дослідних зразків.

В результаті проведення лабораторних досліджень зразків ґрунтоцементу на основі глинистого ґрунту необхідно було визначити:

1. Міцність зразків на стиск.
2. Залежність міцності ґрунтоцементу від вмісту цементу та В/Ц.
3. Оптимальний вміст цементу, N, та В/Ц відношення.

Виклад основного матеріалу. Процес влаштування ґрунтоцементного елемента полягає в наступному: в процесі буріння свердловини розпушується природний ґрунт. У зону руйнування крізь вертлюг, нагнітають водоцементну суміш, яка ретельно перемішується із пухким ґрунтом. Заглиблюючись на потрібну глибину утворюється ґрунтоцементний елемент. Для утворення більш однорідного матеріалу елемента, перемішування можна проводити кілька разів в межах одного

елементу. Після тужавіння суміші утворюється міцний ґрунтоцементний елемент, який не розмокає у водному середовищі.

Процес виготовлення ґрунтоцементних елементів показано на рис. 1.

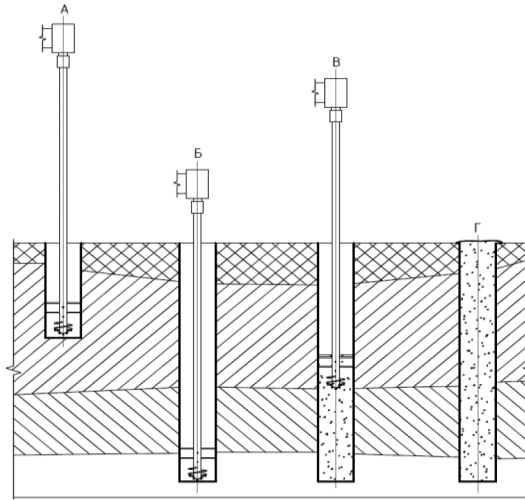


Рис. 1. Технологічна схема влаштування ґрунтоцементних елементів:
 А – буріння свердловини; Б – буріння до проекційної відмітки;
 В – подача цементного розчину, та перемішування його з оточуючим ґрунтом; Г – готовий ГЦЕ

Для підбору оптимального складу ґрунтоцементної суміші були проведені лабораторні дослідження по виготовленню та випробуванню дослідних зразків. Вихідними матеріалами для виготовлення ґрунтоцементу були: цемент; глинистий ґрунт; вода; пластифікатор С-3 (не у всіх випадках).

Цемент. В якості в'язучого для виготовлення експериментальних зразків і їх дослідження використовувався портландцемент марки ПЦ ІІ / Б – Ш – 400.

Ґрунт. Глинистий. Для виготовлення ґрунтоцементу застосовувався ґрунт, відібраний на глибині 2,5 м від поверхні землі (з ПЕ-2) на майданчику будівництва житлового будинку, розташованого в м. Полтава Ґрунт представляє собою суглинок світло-коричневий і коричневий, напівтвердий, карбонатизований з такими фізико-механічними властивостями:

- число пластичності $I_p = 0.14$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0.21$;
- вологість на границі текучості $W_L = 0.35$;
- щільність ґрунту – $\rho = 1.719 \text{ т/м}^3$;
- природна вологість $W = 0.252$;
- щільність частинок ґрунту $\rho_s = 2.68 \text{ т/м}^3$.

Необхідно відмітити, що рівень ґрунтових вод знаходиться нижче глибини відбору ґрунту на 2–2,5 м.

Піщаний. Пісок для дослідів було відібрано на будівельному майданчику десяти поверхового житлового будинку в м. Полтаві. Пісок кварцовий, мілкий, однорідний, від вологого до насиченого водою, середньої щільності, гранулометричний склад наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Гранулометричний склад

Діаметр фракції, мм	> 2	2–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	<0,1
Вміст фракції, %	–	0,4	10	73,0	16,6

Вода. Для приготування ґрунтоцементних зразків застосовувалась звичайна вода з під крану. За хімічним складом вода гідро-карбонатно-кальцієва, слабо мінералізована, слабо лужна, показник рН = 8. Вона не містить шкідливих домішок, що перешкоджають нормальному твердінню цементу.



Рис. 2. Виготовлення суміші для дослідних зразків

Випробування зразків-кубиків на стиск виконували у віці 7, 28, 56 діб за допомогою преса (рис. 3). На кожне випробування було виготовлено по 6 зразків однієї серії (однаковий вміст ґрунту, цементу, в/ц). В результаті випробувань отримано середнє значення міцності на стиск ґрунтоцементу певного віку.

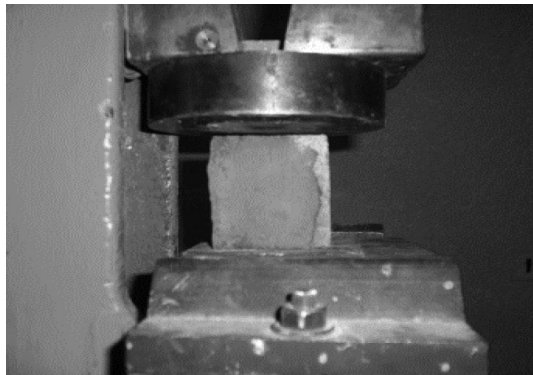


Рис. 3. Випробування зразків ґрунтоцементу на стиск

Метою підбору різних складів ґрунтоцементу є отримання оптимального складу ґрунтоцементу з максимальною міцністю.

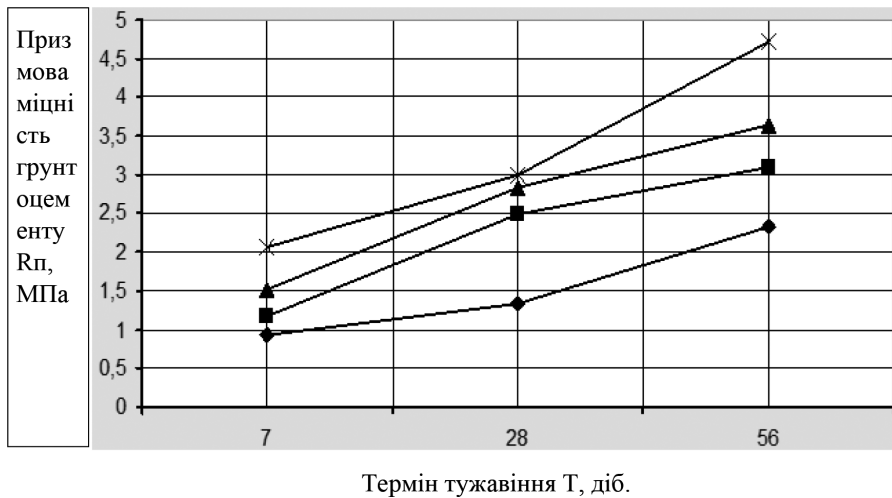


Рис. 4. Результати випробування зразків з різним терміном тужавіння

При будівництві житлового будинку у м. Полтаві були виготовлені дослідні ґрунтоцементні палі, які потім були відкопані шурфом до рівня ґрунтових вод. Його глибина склала біля 6 м (рис. 5). Витрати цементу при виготовленні палі за усією довжиною склали 250 кг/м³ ґрунту (~18 % від маси сухого ґрунту).

Основною задачею досліджень було визначення міцності ґрунтоцементу за довжиною палі. Для цього на її бічній поверхні, з певним кроком, були проставлені маркери випробувань через 2 см (рис. 5). Для досліду було використано мікропенетрометр МВ-2, який призначений для інженерно-геологічного випробування піщаних і глинистих порід у польових і лабораторних умовах. В результаті цих випробувань встановлюється середня глибина заглиблення у породу сталего конуса, який має заданий кут при вершині.



Рис. 5. Дослідження ґрунтоцементної палі за глибиною

За величиною силового впливу на конус визначалася чисельна характеристика опору породи penetрації – умовне граничне напруження зрушення, R:

$$R = \frac{P_m - K_h}{h^2}, \text{ МПа}$$

Результати penetраційних випробувань наведені на графіку рис. 6.

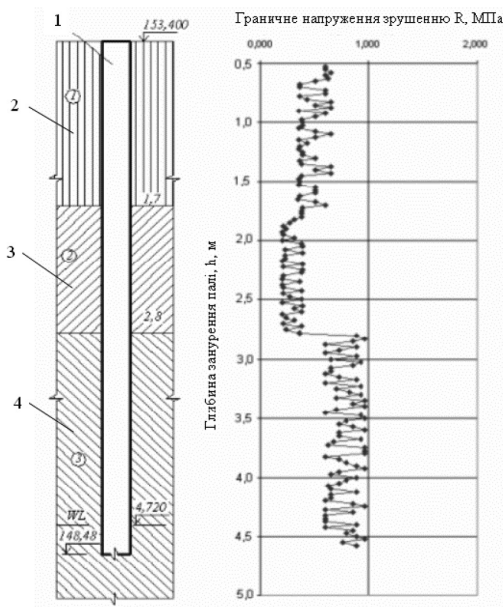


Рис. 6. Графік penetрації тіла ґрунтоцементної палі, влаштованої у глинистих ґрунтах відповідно до наведеного розрізу:
 1 – ґрунтоцементна паля; 2 – суглинок, тугопластичний;
 3 – суглинок тугопластичний; 4 – суглинок лесовий, м'якопластичний

Таблиця 2

Основні дані до аналізу результатів penetраційних випробовувань матеріалу ґрунтоцементної палі за її довжиною

№ шарів ґрунту	Природні характеристики ґрунтів				Кількість визначень, <i>n</i>	Умовне граничне напруження зрушенню <i>R</i> , МПа	Коефіцієнт варіації, <i>v</i>
	Число пластичності I_p , %	Щільність скелету ρ_{sp} , т/м ³	Вологість <i>W</i> , %	Коефіцієнт пористості, <i>e</i>			
1	12	1,43	22	0,867	49	4,73	0,21
2	15	1,41	26	0,901	42	2,93	0,25
3	9	1,49	27	0,785	72	7,83	0,17

За даними результатів penetраційних випробовувань матеріалу ґрунтоцементної палі за її довжиною можливо зробити такі основні висновки:

- графік зміни опору penetрації за глибиною занурення палі чітко відповідає інженерно-геологічному розрізу, а саме його літологічній будові;
- при близьких механічних характеристиках природних ґрунтів, що можливо стверджувати за даними буріння, і однаковою вмісті цементу, опір penetрації окремих ділянок палі відрізняється більше ніж у 2,5 рази;
- головною причиною такої різниці не може бути водоцементне відношення суміші «ґрунт-цемент-вода», тому що для другої і третьої ділянок палі В/Ц практично однакове, а різниця за напруженням *R* найбільша;

– головним фактором при формуванні механічних властивостей ґрунтоцементу є вміст у ґрунті глинистих частинок та їх взаємодія з цементом; чим більше таких частинок у ґрунті, тим слабкіші жорсткі структурні зв'язки, які встановлюються у ґрунті з допомогою цементу; при усіх інших однакових показниках (В/Ц, вміст цементу, його марка тощо;

– у нашому випадку вміст глинистих частинок у ґрунтах розрізу визначається числом пластичності, найбільше його значення для шару 2, а найменше – для шару 3; відповідно граничне напруження зрушенню масо $R = 2,93$ МПа та $R = 7,83$ МПа;

– результати проведених досліджень з виготовлення ґрунтоцементу підтверджують дані, отримані у лабораторних умовах звичайним перемішуванням суміші «ґрунт-цемент-вода» у розчиномішалках.

Метод влаштування стрічкових фундаментів на штучній основі, яка підсилена вертикальними елементами армування, було досліджено при будівництві багатоповерхового житлового будинку в нагорній частині м. Полтави. Інженерно-геологічні характеристики ґрунтів ділянки відповідно до розрізу на рис. 7 наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Характеристики ґрунтів ділянки

Нашарування ґрунтів	Число пластичності, I_p	Щільність ρ , т/м ³	Кут внутр. тертя, φ°	Питоме зчленення c , кПа	Модуль деформації E , МПа	Модуль E армованого ґрунту, МПа
ІГЕ–2	14	1,61	23	14	12/5	17
ІГЕ–3	12	1,64	24	9	8/4	16
ІГЕ–4	17	1,91	25	24	14	

ґрунтоцементні елементи, які прийняті у проекті для армування основи, мають діаметр 200 мм і довжину нижче дна котловану – 5300 мм. Наявність армування основи збільшує до необхідної величини її модуль деформації. Значення його залежить від відстані між елементами армування, яка у даному випадку коливалася від 600 до 800 мм. У табл. 3 наведені значення E для шагу елементів у 600 мм.

Для перевірки ефективності армування основи у конкретних умовах будівельного майданчика були проведені дослідження її стисливості шляхом випробовування ґрунтів штампом. Перевірка стисливості основи була проведена у природному і зволоженому станах ґрунту до та після його армування.

Розрахункову схему випробовувань прийнято відповідно до наведеної на рис. 7. При відстані між елементами 600 мм штамп розміром у плані 1200 × 1200 мм завантажує площу, яка армована 12 елементами.

Польові випробовування ґрунтів штампами виконані відповідно до ДСТУ Б В.2.1.-7-2000 (ГОСТ 20276-99) ґрунти. Польові випробовування. Для створення вертикального стискуючого навантаження на штамп була використана вантажна платформа з бетонними фундаментними блоками загальною вагою 800 кН. Вона слугувала упором для гідравлічного домкрату. Навантаження штампів ступенями по 62–92 кН проведено гідравлічним домкратом ДГ – 100. Тиск у домкраті

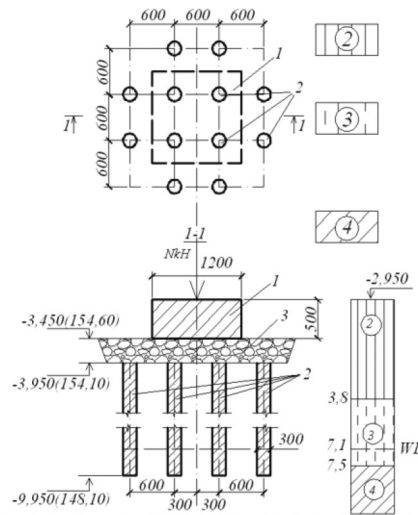


Рис. 7. Схема випробувань основи, яка армована вертикальними ґрунтоцементними елементами, залізобетонним квадратним штампом:
1 – штамп; 2 – ГЦЕ; 3 – розподільча подушка

створювали за допомогою насосної станції НС – 600 Для виміру осідання штампу на реперній системі з сталюого прокату використано чотири прогиноміри конструкції Аістова з ціною поділки 0,01 мм.

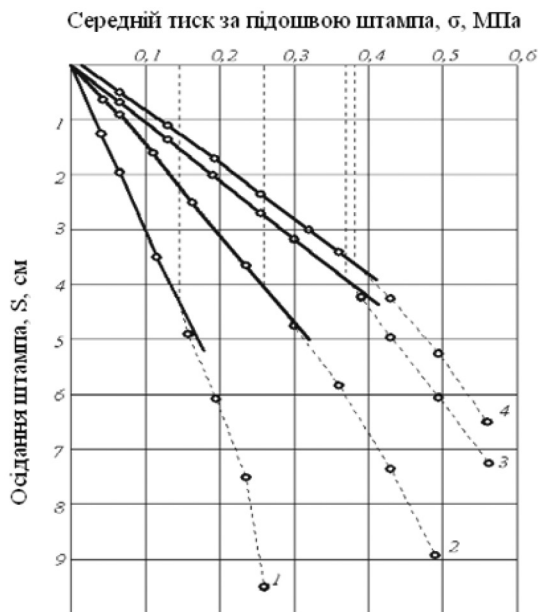


Рис. 8. Результати випробувань основи штампом:
1 – природна зволожена; 2 – природна; 3 – армована зволожена;
4 – армована не зволожена

Зволоження ґрунту нижче підшови фундаменту виконано за такою схемою: зволожено масив на якому розташовано 12 елементів армування з відстанню між ними 600 мм. Для цього відкопано котлован розмірами у плані 2000 × 2000 мм і глибиною 0,25 м. За наведеною схемою пробурені 5 свердловин діаметром 150 мм глибиною по 4,0 м (до рівня ґрунтової води). Кожну свердловину заповнили щебенем діаметром 20–40 мм. Котлован заповнено щебенем тієї ж фракції.

На рис. 8 наведені графіки залежності осідання штампу від навантаження для чотирьох різних станів основи житлового будинку, які були визначені вище.

З урахуванням задекларованих положень модуль деформації і розрахунковий опір основи за результатами випробовувань штампамі склали для:

- природної основи $E = 9,5$ МПа; $= 0,260$ МПа;
- для зволоженої природної основи $E = 5$ МПа; $= 0,145$ МПа;
- для армованої основи $E = 15,6$ МПа; $= 0,385$ МПа;
- для зволоженої армованої основи $E = 14,5$ МПа; $= 0,370$ МПа.

Використання вказаного способу закріплення основи у ґрунтових умовах першого типу за просадочністю показало, що армування ґрунту практично нейтралізувало його просадочні властивості. При цьому стисливість основи зменшилася у 3 рази, а розрахунковий опір її підвищився удвічі. Це дозволило використати стрічкові залізобетонні фундаменти при будівництві 14-поверхового житлового будинку із цегляними несучими стінами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. ДСТУ Б В.2.7-214:2019. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Чинний від 2020-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2019. 15 с.
2. Bondar V., Shulgin V., Demchenko O., Bondar L. Experimental study of properties of heavy concrete with bottom ash from power stations // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116. Article No. 02007. DOI: 10.1051/mateconf/201711602007 (Transbud-2017).
3. Petrash O., Zotsenko V., Petrash R., Popovych N., Rozhko I., Danova K., Malysheva V., Nikitchenko O., Moroz M., Bogatov O. A mechanized assembly for erecting soil-cement barriers to protect agricultural lands from low-active waste during flood. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 5, No. 10(131). P. 29–36.
4. Vu, P. T. A. (2016). Ground improvement using soil-cement method: a case study with laboratory testing and in-situ verification for a highway project in southern Vietnam. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 47(1), 45–49.

REFERENCES:

1. DSTU, B. (2009). 2.7-214: 2009. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy. [Building materials. Concretes. Methods for determining strength using test specimens.] chynnyi vid 2009-12-22.–K. : *Minregionbud Ukrainy*, 2010.–18 s.
2. Bondar, V., Shulgin, V., Demchenko, O., & Bondar, L. (2017). Experimental study of properties of heavy concrete with bottom ash from power stations. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 116, p. 02007). EDP Sciences.
3. Petrash, O., Zotsenko, V., Petrash, R., Popovych, N., Rozhko, I., Danova, K., ... & Bogatov, O. (2024). A MECHANIZED ASSEMBLY FOR ERECTING SOIL-CEMENT BARRIERS TO PROTECT AGRICULTURAL LANDS FROM LOW-ACTIVE WASTE DURING FLOOD. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 131(10).
4. Vu, P. T. A. (2016). Ground improvement using soil-cement method: a case study with laboratory testing and in-situ verification for a highway project in southern Vietnam. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 47(1), 45–49.